مطالعهٔ آزمایشگاهی گودبرداری به‌روش سیستم ترکیبی شمع و انکراژ*

محمود عبدالهی[۱] جعفر بلوری بزاز[۲]

چکیده در این مقاله بااستفاده از تکنیک مدل‌سازی فیزیکی به مطالعهٔ آزمایشگاهی دیوار حائل شمع درجا با مهاربندی انکراژ در خاک ماسه‌ای پرداخته شده‌است. نتایج کل آزمایش‌ها در این پژوهش حاکی از آن است که نسبت بیشینه تغییرمکان جانبی دیوار به عمق گودبرداری (δ_{hm}/H) در محدودهٔ ۰/۱۴۵٪ الی ۰/۵۱٪ قرار دارد. هم‌چنین، نسبت بیشینه نشست سطح زمین به عمق گودبرداری (δ_{vm}/H) در محدودهٔ ۰/۱۱٪ الی ۰/۷۶٪ اندازه‌گیری شده‌است. هم‌چنین، در این پژوهش به بررسی مکان بیشینه جابه‌جایی جانبی دیواره، تعیین الگوی نشست سطحی زمین به‌منظور استفاده برای مطالعات آزمایشگاهی و نیز، تعیین عمق مدفون دیوارهٔ شمعی پرداخته شده‌است.

واژه‌های کلیدی مطالعهٔ آزمایشگاهی، گودبرداری، انکراژ، نشست زمین، تغییرشکل دیوار.

Experimental Study of the Excavation Using Pile-Anchorage System

M. Abdollahi J. Bolouri Bazaz

Abstract *In this paper, a laboratory study of the Bored Pile Retaining Wall with Anchorage Bracing in sandy soils has been conducted. To this end, the physical modeling in laboratory condition was used. The results of the experiments suggest that the ratio of maximum lateral displacement of wall to the depth of excavation (δ_{hm}/H) is in the range of 0.145% to 0.51%. Also, the ratio of maximum ground surface settlement to the depth of excavation (δ_{vm}/H) is estimated in the range of 0.11% to 0.76. Furthermore, this study investigated the location of maximum lateral displacement of the walls, the ground surface settlement pattern to be used in laboratory studies and determination of the depth of penetration pile.*

Key Words Laboratory Study, Excavation, Anchor, Ground Settlement, Wall Deflection.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۱/۲۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۱/۲۰ می‌باشد.

(۱) دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، گروه عمران گرایش ژئوتکنیک، دانشگاه فردوسی، مشهد.

(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد.

Email:bolouri@um.ac.ir

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل رایج در صنعت ساخت و ساز ساختمانی دنیای امروز، نیاز به گودبرداری‌های عمیق در مناطق متراکم شهری می‌باشد. گودبرداری‌های عمیق تأثیر به‌سزایی در تغییر توزیع تنش در لایه‌های خاک و هم‌چنین جابه‌جایی زمین دارند. گودها می‌توانند باعث انحراف جانبی دیوار و حرکت زمین شوند که ممکن است باعث آسیب به ساختمان‌ها و تجهیزات مجاور شود؛ لذا گودبرداری و سازهٔ نگهبان به‌عنوان یکی از مسائل چالش‌برانگیز در مهندسی عمران به‌شمار می‌رود. عدم دقت در طرح، محاسبه و اجرای گودبرداری‌ها و سازه‌های نگهبان مهارکننده در مناطق شهری و در مجاورت ساختمان‌ها، می‌تواند خسارات جانی و مالی گسترده‌ای درپی داشته‌باشد؛ بنابراین تخمین خسارت ناشی از گودبرداری برروی سازه‌های مجاور گود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. میزان و شکل جابه‌جایی دیوار ناشی از گودبرداری‌های عمیق بستگی به عوامل گوناگون دارد.

مطالعات زیادی برروی رفتار دیوار بر اثر گودبرداری‌های عمیق صورت گرفته‌است [1-6]، هم‌چنین، چندین مطالعه برروی جابه‌جایی‌های زمین ناشی از گودبرداری در رس‌ها انجام شده‌است [7-12]، اما محققان کمی گودبرداری در ماسه‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند [5,13]. از طرفی روش‌های عددی می‌توانند جابه‌جایی‌های ناشی از گودبرداری را پیش‌بینی نمایند، اما اغلب انتخاب یک مدل ساختاری مناسب و تعریف پارامترهای مربوط به خاک از مهم‌ترین عوامل درجهت دست‌یابی به نتایج دقیق است [14]؛ لذا بااستفاده از مدل‌سازی فیزیکی به بررسی اهداف ذکرشده در این پژوهش پرداخته شده‌است. مدل‌سازی فیزیکی یکی از روش‌های معتبر برای بررسی این روش‌ها و تأیید صحت محاسبات می‌باشد. مدل‌سازی فیزیکی عبارت است از ساختن مدل مقیاس‌شده‌ای از ابنیهٔ ژئوتکنیکی و انجام بارگذاری لازم برروی آن برای شبیه‌سازی شرایط واقعی. مدل‌سازی فیزیکی هم‌چنین می‌تواند برای صحت‌سنجی نتایج تحلیل‌های عددی به‌کار رود. در منابع فنی روابطی برای انتخاب صحیح نسبت ابعادی وجود دارد که می‌توانند مورد بررسی قرار گیرند. استفاده از مدل‌سازی فیزیکی یا کوچک‌مقیاس روشی است که در مهندسی ژئوتکنیک سابقه‌ای دیرینه دارد. ون [15] اولین کسی بود که استفاده از مدل شمع را گزارش کرد و مطالعات خود را برروی شمع‌های مایل و قائم متمرکز نمود. هم‌چنین، مطالعاتی درجهت بارگذاری جانبی شمع در خاک‌های چسبنده توسط مدل فیزیکی انجام شد [16]. آزمایش‌های استاتیکی و سایکلیک برروی گروه‌های شمع مدفون در خاک‌های ماسه‌ای انجام شد و این نتیجه به‌دست آمد که اثر گروه برای زمانی‌که فاصلهٔ شمع‌ها بیش از هشت برابر قطر شمع باشد، ناچیز است [17]. هم‌چنین تست بارگذاری جانبی روی شمع‌های مدل قائم و مایل انجام شد تا معیار طراحی پی برای انجمن مهندسی ارتش آمریکا توسعه داده شود [18].

در پژوهش حاضر سعی شده‌است با ساخت یک مدل آزمایشگاهی، رفتار گودبرداری به‌روش سیستم ترکیبی شمع و انکراژ و به‌ویژه نحوهٔ اعمال پیش‌تنیدگی انکر در آزمایشگاه مدل شود و رفتار گودبرداری‌های عمیق در مجاورت ساختمان (با اعمال سربار معادل) مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

توصیف مدل فیزیکی

همان‌گونه که قبلاً بیان شد در این پژوهش به مطالعهٔ آزمایشگاهی رفتار گودبرداری در خاک ماسه‌ای بااستفاده از مدل‌سازی فیزیکی پرداخته شده‌است. به‌منظور رسیدن به اهداف مورد نظر در این پژوهش، مدل فیزیکی شامل یک جعبهٔ فلزی به‌عنوان محیط گود به طول دو متر، عرض و ارتفاع یک متر می‌باشد. هم‌چنین جعبهٔ فوق دارای فضای کافی برای بارگذاری سازه به‌عنوان سربار موجود در مجاورت محل

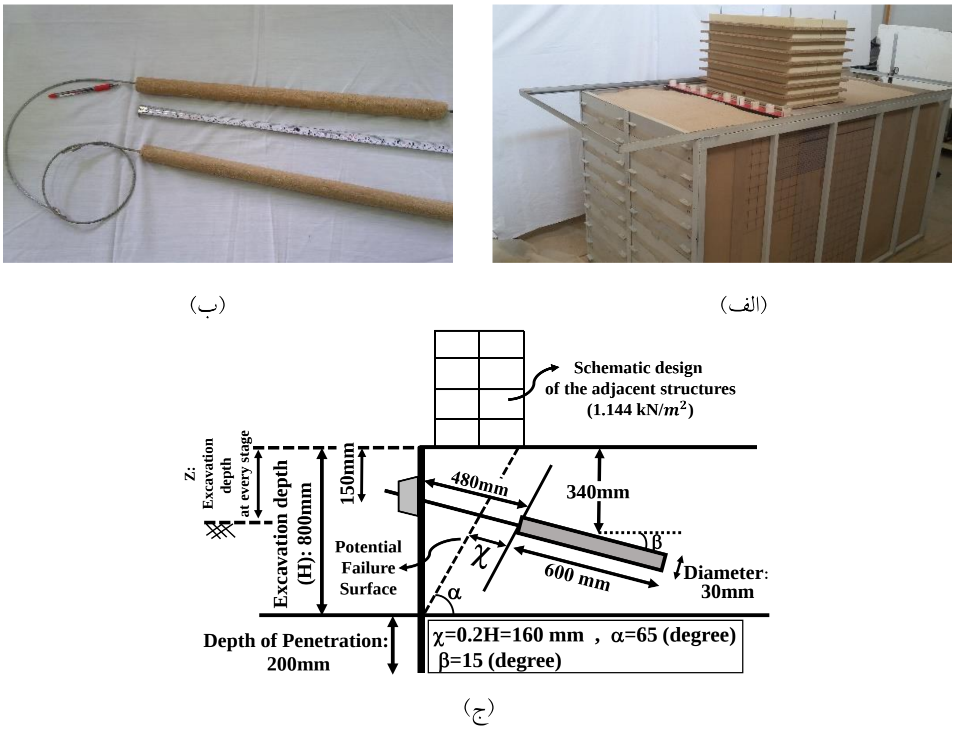
گودبرداری می‌باشد. جداره‌های این جعبه توسط طلق‌های شفاف برای مشاهدهٔ روند تغییرشکل‌ها پوشانده شده‌است.

به‌منظور مدل‌سازی شمع‌های سیستم سازهٔ نگهبان از تعدادی لوله از جنس پلی‌پروپیلن که مشخصات آنها در جدول (۱) آورده شده‌است استفاده گردیده‌است. ابعاد این شمع‌ها به‌صورت مقیاس‌شده نسبت‌به مدل واقعی انتخاب شده‌است. شایان ذکر است که مشخصات ارائه‌شده برای شمع در جدول (۱) حاصل از برگه‌های اطلاعاتی تهیه‌شده از کارخانهٔ سازنده می‌باشد. براساس سختی شمع‌ها و تشابه ابعادی، درنهایت با بررسی گزینه‌های موجود و هم‌چنین داشتن اطلاعاتی نظیر ابعاد هندسی و مدول الاستیسیتهٔ مورد نظر، لوله‌های پلی‌پروپیلن برای انجام مدل‌سازی انتخاب گردیده‌است.

شکل (۱) نمایی از جعبهٔ آزمایش و مدل مقیاس‌شده‌ای از سازهٔ مجاور گود را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که بااستفاده از روابط مدل‌سازی فیزیکی و تشابه ابعادی و باتوجه به بارهای مرده و زندهٔ سازه‌ها، اقدام به تهیهٔ این مدل شده‌است. هم‌چنین در این شکل طرحی شماتیک از جعبهٔ آزمایش و تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است که برای مدل کردن مراحل گودبرداری، از ۱۰ دریچه به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در قسمت جلویی جعبهٔ آزمایش استفاده شده‌است. با برداشتن هر یک از این دریچه‌ها، یک مرحله از گودبرداری مدل می‌شود.

جدول ۱ مشخصات شمع‌های مورد استفاده در مدل‌سازی فیزیکی

جنس	ضخامت (mm)	قطر داخلی (mm)	قطر خارجی (mm)	طول (mm)	مدول الاسیسته (GPa)
پلی‌پروپیلن	۶/۷	۲۶/۶	۴۰	۱۰۰۰	۲



(الف) (ب)

(ج)

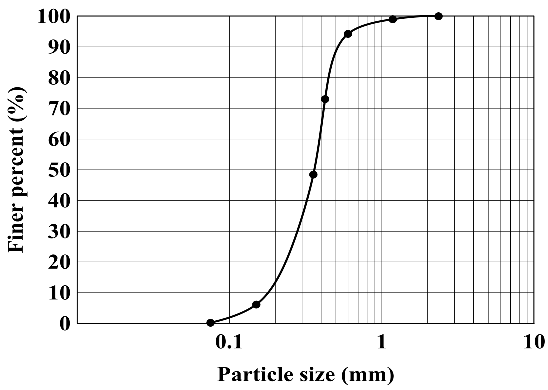
شکل ۱ (الف) نمای واقعی، (ب) نمایی از انکرهای مورد استفاده در مدل، (ج) مقطع عرضی مدل فیزیکی

مصالح

در آزمایش‌های صورت‌گرفته، از ماسهٔ شکستهٔ سیلیسی استاندارد شمارهٔ ۱۶۱ فیروزکوه استفاده شده‌است. شکل (۲) منحنی دانه‌بندی را ارائه می‌دهد و جدول (۲) نیز بیانگر مشخصات فیزیکی این ماسه می‌باشد.

جدول ۲ خواص فیزیکی ماسه ۱۶۱

وزن مخصوص خشک (kN/m^3)	۱۵/۷۵	زاویهٔ اصطکاک داخلی (Degree)	۴۰
G_s	۲/۶۵۸	D_{10} (mm)	۰/۱۶۷
e_{min}	۰/۶۰۳	D_{60} (mm)	۰/۴۰
e_{max}	۰/۹۴۳	Cc	۱/۰۱۲
		Cu	۲/۳۹۵



شکل ۲ منحنی توزیع دانه‌بندی ماسهٔ فیروزکوه شمارهٔ۱۶۱

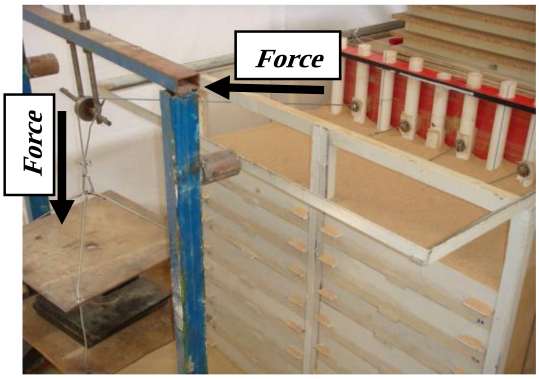
انکراژ و پیش‌تنیدگی در مدل فیزیکی

روش انکراژ یا دوخت به پشت، از جمله مهم‌ترین روش‌های اجرای سازهٔ نگهبان است که به‌طور نسبتاً گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش از کابل‌های پیش‌تنیدگی و یا استرندها استفاده می‌شود. قسمت‌های مختلف یک سیستم انکراژ شامل طول قسمت مهارشده و مهارنشده، بلوک بتنی، استرندها و صفحهٔ تکیه‌گاهی و گوه می‌باشد. به‌طور خلاصه مراحل کار در پایدارسازی گودبرداری به‌روش اجرای مهار شامل حفاری، قرار دادن کابل، تزریق انتها و درانتها کشیدن مهارها می‌باشد. در این پژوهش، یک مدل فیزیکی متشکل از سیستم انکراژ و شمع، طراحی و ساخته شده‌است. به این منظور باتوجه به مدلی واقعی از مطالعات تشابه ابعادی کمک گرفته شده‌است. شکل (۱- ب و ج) طرحی شماتیک از سیستم انکراژ ساخته‌شده درجهت انجام مطالعات آزمایشگاهی و نیز ابعاد درنظر گرفته‌شده برای قسمت‌های مختلف مدل را نشان می‌دهد. شکل (۳) مخزن آزمایش را نشان می‌دهد که با سیستم بارش تا تراز قرارگیری انکر پر شده‌است. در این مرحله انکرها با زاویهٔ ۱۵ درجه در خاک قرار داده می‌شوند و از جلو به دیوار، بدون اعمال هیچ‌گونه نیرویی متصل می‌شوند. سپس بارش ماسه (در جلو و پشت دیوار) تا پر شدن کامل آن ادامه می‌یابد.



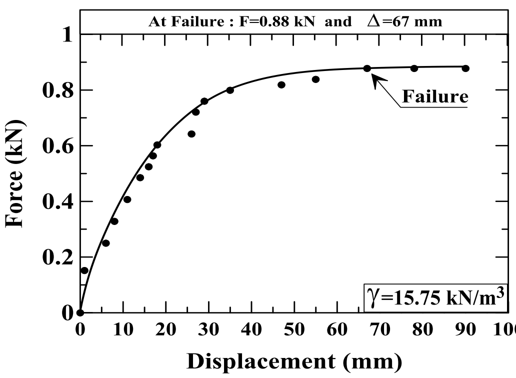
شکل ۳ نمایش سیستم انکراژ قبل از تکمیل شدن مدل فیزیکی

پس‌از پر شدن کامل مخزن توسط دستگاه بارش ماسه باتوجه به دانسیتهٔ نسبی مورد نظر، اقدام به خاکبرداری مرحله‌ای مطابق با توضیحات ارائه‌شده در بخش‌های قبل می‌گردد. خاک‌برداری تا اولین تراز از ردیف انکرها، ادامه می‌یابد. حال نوبت به پیش‌تنیده کردن انکرها می‌رسد. به‌منظور پیش‌تنیده کردن انکرها در محیط آزمایشگاهی از سیستم کابل و قرقره مطابق با شکل (۴) کمک گرفته شده‌است.



شکل ٤ پیش‌تنیده کردن انکرها توسط سیستم کابل و قرقره

آزمون پیش‌تنیدگی انکر. به‌منظور تعیین مقدار نیروی پیش‌تنیدگی نهایی یک انکر مدفون در ماسه، آزمون کشش انجام می‌گیرد. این آزمون شامل کشش عناصر مسلح‌کنندهٔ پیش‌تنیده و اندازه‌گیری میزان بار و جابه‌جایی متناظر آن می‌باشد. به‌منظور انجام این آزمون در محیط آزمایشگاهی به‌گونهٔ نشان داده‌شده در شکل (٤) از سیستم کابل و قرقره استفاده شده‌است. بر این اساس، تغییرات نیروی محوری ایجادشده در مهاری (F) متناسب با جابه‌جایی اعمالی (Δ) در شکل (۵) ارائه گردیده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقاومت نهایی مهاری حدود ۹۰ کیلوگرم (۰/۸۸ کیلونیوتن) می‌باشد. درنهایت باتوجه به شرایط اجرایی در پروژه‌های واقعی، نیروی پیش‌تنیدگی مهارها برابر با ٤۵ درصد از کل مقاومت نهایی مهاری انتخاب می‌گردد.



شکل ۵ نمودار نیرو- جابه‌جایی آزمون کشش مهار

باتوجه به مطالب گفته شده، جزئیات ترتیب مراحل گودبرداری و اجرای مهارها در مطالعات آزمایشگاهی در جدول (۳) آورده شده‌است.

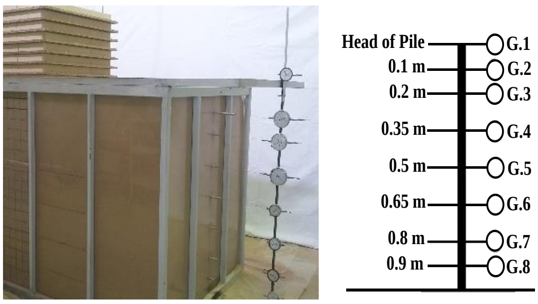
جدول ۳ جزئیات مراحل گودبرداری و نصب مهارها

مراحل گودبرداری	عمق گودبرداری (mm)	مراحل گودبرداری	عمق گودبرداری (mm)
مرحلهٔ ۱	۱۰۰	مرحلهٔ ۵	۵۰۰
مرحلهٔ ۲	۲۰۰	مرحلهٔ ٦	٦۰۰
نصب انکرها		مرحلهٔ ۷	۷۰۰
مرحلهٔ ۳	۳۰۰	مرحلهٔ ۸	۸۰۰
مرحلهٔ ٤	٤۰۰		

توضیحات تکمیلی پیرامون نحوهٔ گودبرداری در بخش‌های قبلی آورده شده‌است. عمق گودبرداری ۸۰۰ میلی‌متر و عمق نفوذ مجموعهٔ دیوارهٔ سازهٔ نگهبان و شمع معادل ٪۲۰ عمق گودبرداری یعنی ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد.

ابزار

شکل (٦) نمایشی از ابزارهای اندازه‌گیری تغییرمکان جانبی مورد استفاده در مدل‌سازی فیزیکی در پژوهش حاضر است.



(ب) (الف)

شکل ٦ موقعیت قرارگیری گیج‌های مکانیکی برای اندازه‌گیری تغییرمکان جانبی، الف) طرح شماتیک، ب) در مدل فیزیکی

برنامهٔ آزمایش‌ها

به‌منظور ارزیابی رفتار سازهٔ نگهبان مدل‌شده در آزمایشگاه، سه پارامتر اصلی شامل فاصلهٔ بین شمع‌ها (S/D)، وجود سربار در مجاورت گودبرداری و نیز گیرداری انتهای شمع‌ها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌است. شایان ذکر است نوع سیستم سازهٔ نگهبان مدل‌شده از نوع دیوار حائل شمع درجا به‌همراه مهاربندی انکراژ می‌باشد. در پژوهش حاضر ۸ آزمایش انجام شده‌است که مشخصات آنها در جدول (٤) آورده شده‌است. هر آزمایش با یک کد مشخص شده‌است. حرف دوم که S یا N می‌باشد، بیانگر وجود سربار در مجاورت گود می‌باشد. حرف سوم نوع گیرداری شمع‌ها را به کف مخزن نشان می‌دهد، درصورت گیردار بودن شمع (بستر سخت) حرف X و درصورت آزاد بودن انتهای شمع (بستر نرم) حرف F آورده شده‌است. عدد سه رقمی آخر هر کد نیز فاصلهٔ مرکز تا مرکز شمع‌ها (mm) است.

جدول ٤ جزئیات و مشخصات هر آزمایش

ردیف	کد آزمایش	سربار	وضعیت گیرداری
۱	TNX150	-----	گیردار
۲	TNF150	-----	آزاد
۳	TSX150	با سربار	گیردار
٤	TSF150	با سربار	آزاد
۵	TNX100	-----	گیردار
٦	TNF100	-----	آزاد
۷	TSX100	با سربار	گیردار
۸	TSF100	با سربار	آزاد

دیوار با پای گیردار (Fixed earth support) (بستر سخت)

شکل (۷) تصویری از صفحات ایجادکنندهٔ گیرداری و یا به‌عبارتی مدل نمودن بستر سخت در انتهای دیوارهٔ شمعی می‌باشد. به‌منظور مدل نمودن گیرداری در انتهای دیوارهٔ شمعی (بستر سخت)، از یک صفحهٔ فلزی با تعدادی میلهٔ کوتاه به‌طول ۰/۰۵ متر که به‌صورت قائم برروی صفحه جوش داده شده‌است، استفاده می‌گردد. فواصل مرکزبه‌مرکز میله‌های جوش داده‌شده بستگی به فواصل شمع‌های دیوارهٔ گود دارد. این فواصل درجهت انجام آزمایش‌ها برابر با ۰/۱ و ۰/۱۵ متر انتخاب شده‌است که از این فواصل برای جوش دادن میله‌ها برروی صفحهٔ فلزی استفاده گردیده‌است.



شکل ۷ نحوهٔ مدل نمودن بستر سخت در مدل فیزیکی (فواصل مرکزبه‌مرکز لوله‌های جوش داده‌شده برابر با ۰/۱ و ۰/۱۵ متر است)

تغییرشکل‌های ناشی از گودبرداری

هنگام گودبرداری به‌دلیل آزاد شدن تنش، دیوارهٔ گود تغییرشکل جانبی می‌دهد که این به‌نوبهٔ خود نشست زمین را به‌ویژه در نقاط مجاور گود موجب می‌شود. در بخش‌های زیر تغییرشکل‌های بیان‌شده، که در طول گودبرداری (در مدل آزمایشگاهی) ایجاد می‌شوند، شرح داده شده‌است.

جابه‌جایی جانبی دیوار

هنگام گودبرداری، به‌دلیل تغییرات گستردهٔ سطح تنش، دیوارهٔ گود تغییرشکل پیدا می‌کند و تغییرشکل‌هایی را به زمین مجاور و سازه‌های مجاور گود تحمیل می‌کند. با تغییرشکل پیدا کردن سازهٔ نگهبان، خاک پشت دیوار به‌سمت جلو و پایین حرکت می‌کند و سطح زمین دچار نشست می‌شود. به‌منظور اندازه‌گیری تغییرمکان جانبی سازهٔ نگهبان مدل فیزیکی، از گیج‌های مکانیکی که در شکل (٦) نشان داده شده‌اند استفاده گردیده‌است. فواصل قائم بین هر یک از گیج‌ها به‌گونه‌ای انتخاب

شده‌اند تا بتوان با داشتن تغییرمکان در طول کل شمع، پروفیل جابه‌جایی دیوار را با دقت مطلوب رسم نمود. جدول (۵) بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوار را هنگامی که عمق گودبرداری به پایین‌ترین سطح (H=800 mm) می‌رسد برای هر آزمایش نشان می‌دهد. هم‌چنین در این جدول نسبت بیشینه تغییرمکان جانبی دیوار (δ_{hm}) به عمق گودبرداری (H) نیز ارائه شده‌است.

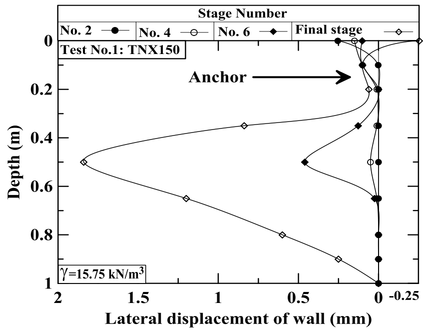
جدول ۵ مقادیر بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوار

عنوان آزمایش	بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوار (δ_{hm}) (mm)	δ_{hm} / H (%)
TNX150	۱/۸٤	۰/۲۳
TNF150	۱/۱٦	۰/۱٤٥
TSX150	۲/٤	۰/۳
TSF150	۱/۳٤	۰/۱۷
TNX100	۳/۱	۰/۳۹
TNF100	۱/۷	۰/۲۱
TSX100	٤/۱	۰/۵۱
TSF100	۲/۲	۰/۲۸

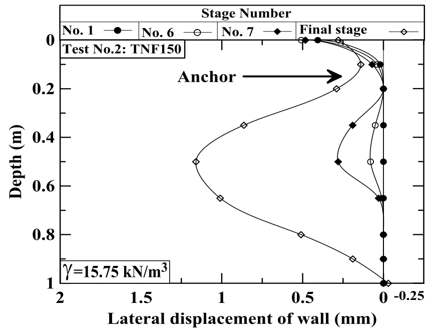
نمودارهای جابه‌جایی جانبی دیوار

همان‌گونه که در بخش قبل بیان شد، تغییرمکان‌های جانبی دیوارهٔ گود ناشی از گودبرداری در مدل آزمایشگاهی توسط هشت عدد گیج نصب‌شده اندازه‌گیری می‌شود. شکل‌های (۸) و (۹)، مربوط به آزمایش‌هایی است که فواصل شمع‌های سازهٔ نگهبان از یکدیگر به‌ترتیب برابر با ۱۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بوده‌است. موقعیت قرارگیری گیج‌های نصب‌شده در ارتفاع دیوار در شکل (٦) نشان داده شده‌است.

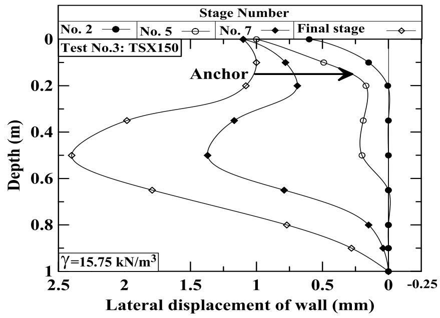
همان‌گونه که در شکل‌های (۸) و (۹) ملاحظه می‌شود جابه‌جایی جانبی دیوار با پیشرفت مراحل گودبرداری افزایش می‌یابد. جابه‌جایی دیوار در مراحل اولیهٔ گودبرداری، دارای رفتاری طره‌ای است و با پیشرفت مراحل گودبرداری و نصب مهارها به رفتار طره‌ای پایه‌دار تغییر پیدا می‌نماید. رفتار مشاهده‌شده در این تحقیق با نتایج به‌دست‌آمده توسط محققان قبلی هم‌خوانی خوبی دارد [4, 5, 19, 0].



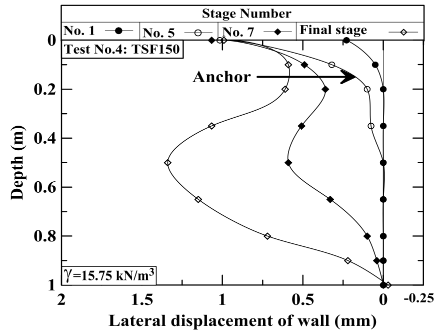
(الف)



(ب)

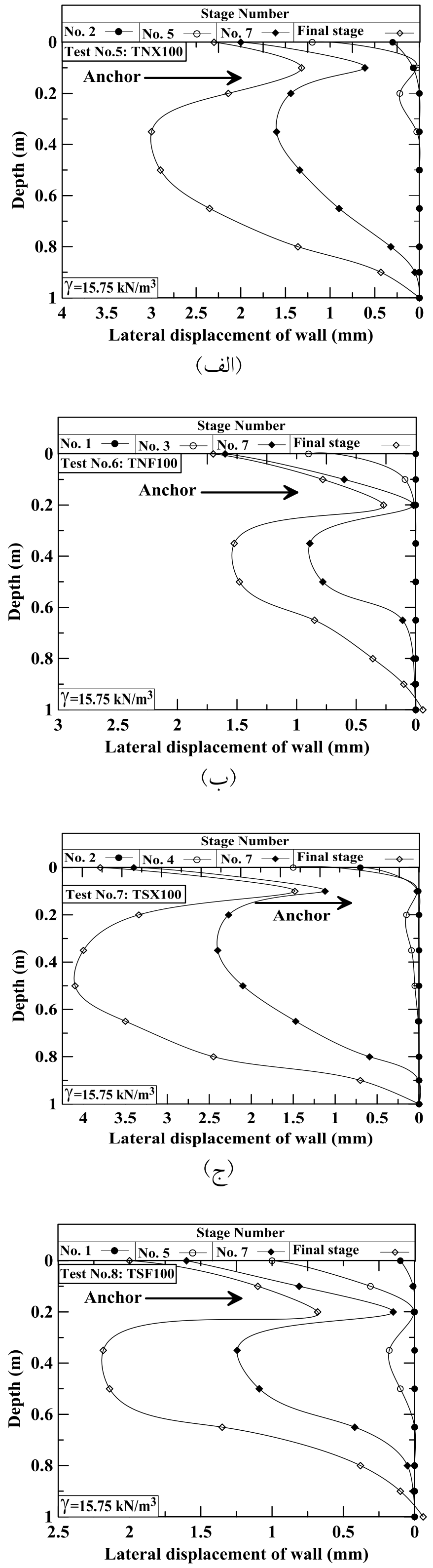


(ج)



(د)

شکل ۸ نمودارهای جابه‌جایی جانبی دیوار ناشی از گودبرداری (فاصلهٔ مرکزبه‌مرکز شمع‌ها ۱۵۰ میلی‌متر)



شکل ۹ نمودارهای جابه‌جایی جانبی دیوار ناشی از گودبرداری (فاصلهٔ مرکزبه‌مرکز شمع‌ها ۱۰۰ میلی‌متر)

برای هر یک از آزمایش‌های انجام‌شده، بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوار (δ_{hm}) در آخرین مرحلهٔ گودبرداری در جدول (۵) آورده شده‌است. مقدار δ_{hm} در آزمایش‌ها شمارهٔ ۱ الی ٤ در بازهٔ ۱/۱٦ الی ۲/٤ میلی‌متر و برای آزمایش‌های شمارهٔ ۵ الی ۸ نیز در بازهٔ ۱/۷ الی ٤/۱ میلی‌متر بوده‌است. هم‌چنین، نسبت بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوار به عمق گودبرداری (δ_{hm}/H) برای آزمایش‌های ۱ الی ٤، در بازهٔ ٪۰/۱٤۵ الی ٪۰/۳ و برای آزمایش‌های ۵ الی ۸ در محدودهٔ ٪۰/۲۱ الی ٪۰/۵۱ قرار گرفته‌است. این نتایج مطابق با گزارش‌های ارائه‌شده توسط هسیونگ [5]، وانگ و همکاران [6]، موورمن [21]، لانگ [11]، اوو و همکاران [20]، کلاف و ارورک [22] است و حاصل از مطالعات موردی و صحرایی آنها می‌باشد.

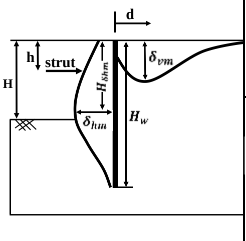
هسیونگ [5] مطالعات کاملی از گودبرداری در ماسه‌ها را ارائه کرد و بیان داشت که نسبت δ_{hm}/H، تا ٪۰/۳ اندازه‌گیری شده‌است. مورمن [21] براساس داده‌های اطلاعاتی از ۵۳۰ مورد تاریخچهٔ مطالعاتی، گزارشی ارائه کرد که در آن مقادیر δ_{hm}/H برای گودبرداری در خاک‌های ماسه‌ای در بازهٔ ٪۰/۲۵ الی ٪۱ قرار داشتند. هم‌چنین لانگ [۱۱] مطابق با ۳۰۰ مورد تاریخچهٔ اطلاعاتی درمورد جابه‌جایی‌های دیوار، بیان داشت که نسبت بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوار به عمق گودبرداری (δ_{hm}/H) حدوداً بین ٪۰/۰۵ الی ٪۰/۲۵ قرار دارد. اوو و همکاران [20] مطابق با مشاهدات میدانی خود بیان داشتند که مقادیر δ_{hm}/H در حدود ٪۰/۵٤ قرار دارد.

مکان قرارگیری بیشینه جابه‌جایی جانبی دیواره

جدول (٦) بیانگر مکان قرارگیری بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوارهٔ گود ($H\delta_{hm}$) از سطح زمین می‌باشد. مطابق با اکثریت نتایج مشاهده‌شده در آزمایش‌های بخش دوم، مقدار $H\delta_{hm}/H$ در بازهٔ ۰/٤٤ الی ۰/٦۲۵ قرار گرفته‌است. فقط در آزمایش شمارهٔ ۱۲ مکان بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوارهٔ گود در نزدیکی سطح زمین و یا به‌عبارتی در قسمت بالای دیواره واقع گردیده‌است

($H\delta_{hm}=0H$). وانـگ و همکـاران [6] مطـابق بـا مشاهدات میدانی و براساس مطالعات موردی خود بیان داشتند که مکان بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوارهٔ گـود در عمق $H\delta_{hm}=0.5H$ تا $H\delta_{hm}=1.4H$ قـرار دارد، امـا از طرفی آنها بیان داشـتند کـه در ٪٤ از مطالعـات مـوردی خود، بیشینه جابه‌جایی جانبی دیواره (δ_{hm}) در قسـمت بالای دیوار مشاهده گردیده‌اسـت؛ بـه‌عبـارتی $H\delta_{hm}=0H$ می‌باشد. تحلیل‌های انجام‌شده توسط مورمن [21] نشان می‌دهند که بیشینه جابه‌جایی جانبی دیـواره بـرای اکثـر گـودبرداری‌هـای عمیـق در خـاک‌هـای نـرم، در عمـق $H\delta_{hm}=0.5H$ تـا $H\delta_{hm}=1.5H$ در زیـر سـطح زمـین مشاهده و گزارش شده‌اند. بنابراین می‌توان بیـان نمـود، نتایج گزارش‌شده در پژوهش حاضر و مقادیر ارائه‌شـده برای $H\delta_{hm}/H$ در جدول (٦)، مطابقت خـوب و قابـل قبولی با نتایج و مشاهدات صورت‌گرفته توسط ونـگ و همکـاران [6] ، اوو و همکـاران [23] و گـزارش‌هـای ارائه‌شده توسط مورمن [21] دارد.

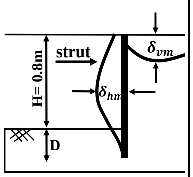
جدول ٦ مکان بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوارهٔ گود ($H\delta_{hm}$)

عنوان آزمایش	$H_{\delta hm}$ (m)	$H_{\delta hm}/H$	طرحی شماتیک از معرفی $H\delta_{hm}$
TNX150	۰/۵	۰/٦٢٥	
TNF150	۰/۵	۰/٦٢٥	
TSX150	۰/۵	۰/٦٢٥	
TSF150	۰/۵	۰/٦٢٥	
TNX100	۰/۳۵	۰/٤٤	
TNF100	۰	۰	
TSX100	۰/۵	۰/٦٢٥	
TSF100	۰/۳۵	۰/٤٤	

عمق مدفون دیوارهٔ گود مهاربندی‌شده با انکر

در جدول (۷) نسبت عمق مدفون به عمـق گـودبرداری (D/H) برای سیستم‌های پایدارسازی دیوارهٔ شمع درجـا با مهاربندی توسط سیسـتم انکـراژ بیـان گردیـده‌اسـت. عمق مدفون، حداقل عمقی است که منجـر بـه حـداکثر بازده آن می‌گردد. این عمق به‌صورت نسبت عمق نفـوذ دیواره (D) به عمق گودبرداری (H) بیان مـی‌شـود. ایـن بدان معنی است که یکی از راه‌هـای کـاهش تغییرمکـان دیوارهٔ گود، افزایش عمق مدفون دیوار می‌باشـد. مطـابق با نتایج آزمایش‌ها و جدول مذکور ملاحظه می‌گردد کـه درصد نسبت D/H برای برای سیسـتم ترکیبـی شـمع و انکراژ در حدود ٪۲۵ اندازه‌گیری شده‌است. شایان ذکـر است این نسبت مطابق با نتایج آزمایش‌هـایی اسـت کـه در آنها جابه‌جایی جـانبی دیـواره (δ_{hm}/H) در حـدود تغییـرشـکل‌هـای گـزارش‌شـده توسـط سـایر محققـان براساس گودهای پایدار می‌باشد. این نسبت با کارهـای اجرایـی در شـرایط واقعـی کارگـاهی مطابقـت دارد و هم‌چنین، نسبت D/H گـزارش‌شـده در ایـن پـژوهش، مطــابق بــا توصــیه‌هــای پیشــنهادی آیــین‌نامــهٔ FHWA-IF-99-015 برای سیستم انکراژ می‌باشد [24].

جدول ۷ درصد عمق مدفون دیوارهٔ شمعی (D/H)

عنوان آزمایش	D (m)	H (m)	D/H (%)	تعریف پارامتر D/H
TNX150	۰/۲	۰/۸	۲۵	
TNF150				
TSX150				
TSF150				
TNX100				
TNF100				
TSX100				
TSF100				

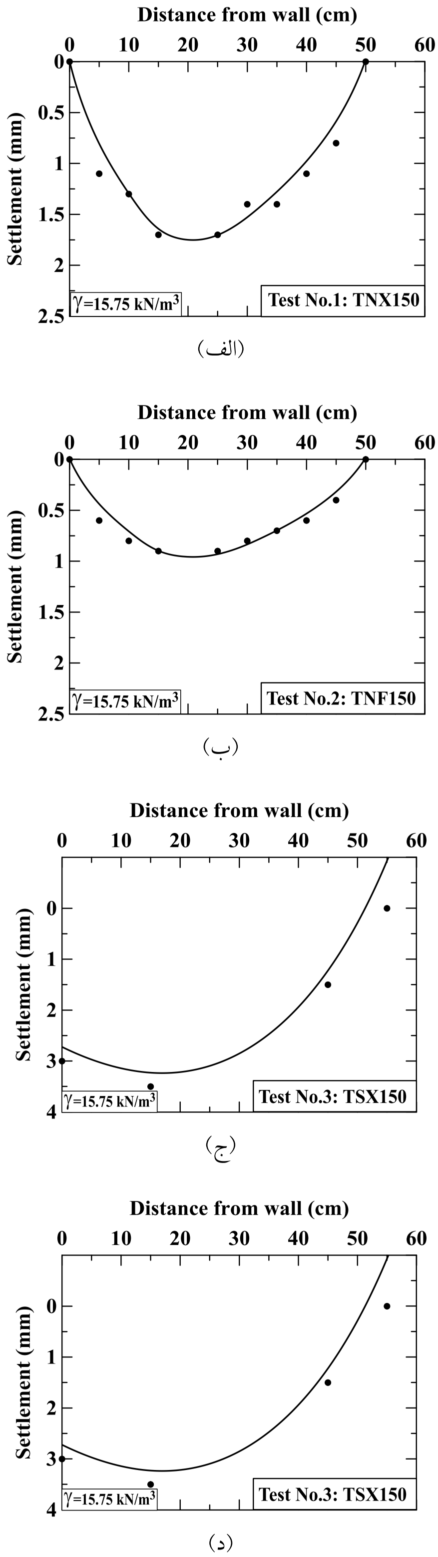
نشست سطحی زمین

بیشینه نشست سطحی زمین(δ_{vm}) ناشی از گودبرداری برای تمامی آزمایش‌های انجـام‌شـده در ایـن پـژوهش، انــدازه‌گیــری و نتــایج آنهــا در جــدول (۸) ارائــه گردیده‌است. در این جدول نسبت بیشینه نشست سـطح زمین (δ_{vm}) نسبت‌بـه ارتفـاع گـودبرداری (H) کـه بـا پــارامتر بــدون بُعــد δ_{vm}/H نشــان داده‌شــده ارائــه گردیده‌است. هم‌چنین شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، پروفیـل نشست سطحی زمین را نشان می‌دهند.

جدول ۸ مقادیر بیشینه نشست سطحی زمین

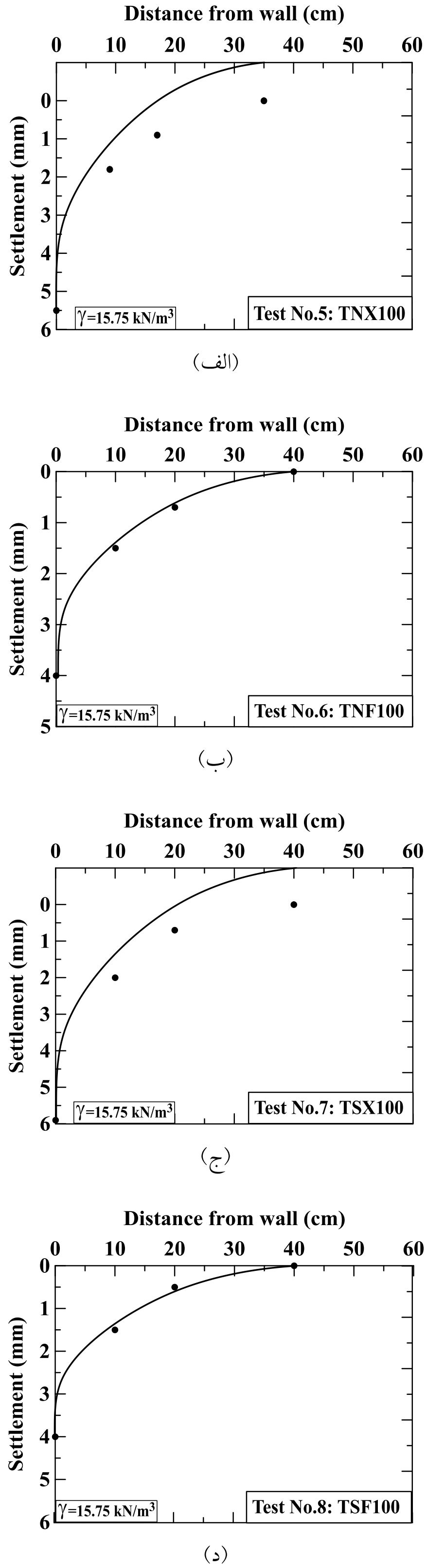
عنوان آزمایش	بیشینه نشست سطحی زمین (δ_{vm}) (mm)	$\delta_{vm}/H(\%)$
TNX150	۱/۷	۰/۲۱
TNF150	۰/۹	۰/۱۱
TSX150	۳/۵	۰/٤٤
TSF150	۲/۳	۰/۲۹
TNX100	۵/۵	۰/٦۹
TNF100	٤	۰/۵
TSX100	٦/۱	۰/۷٦
TSF100	٤	۰/۵

نمودارهای شکل (۱۰) و (۱۱) بیانگر رابطهٔ بین نشست سطح زمین و فاصله از دیوار می‌باشند. مطابق با شکل‌های مذکور، با افزایش عمق گودبرداری (H) و یا به‌عبارت دیگر با پیشرفت مراحل گودبرداری، مقدار بیشینه نشست سطح زمین (δ_{vm}) افزایش پیدا می‌کند که این مطلب با گزارش‌های ارائه‌شده توسط محققان قبلی مطابقت دارد [5, 6, 20]. باتوجه به نمودارهای شکل (۹) نسبت بیشینه نشست سطح زمین به عمق گودبرداری (δ_{vm}/H) در بازهٔ ٪۰/۱۱ الی ٪۰/٤٤ و مطابق با نمودارهای شکل (۱۰) در محدودهٔ ٪۰/۵ الی ٪۰/۷٦ قرار گرفته‌است. این نتایج با گزارش‌های ارائه‌شده توسط محققان قبلی از قبیل وانگ و همکاران [6]، هسیونگ [5] و اوو و همکاران [20] مطابقت دارد. نسبت بیشینه نشست سطح زمین به عمق گودبرداری در مطالعات موردی مورمون [21] واقع در خاک‌های ماسه‌ای در بازهٔ ٪۰/۲۵ الی ٪۱ قرار گرفته‌است. مطابق با مشاهدات میدانی هسیونگ [5] در خاک‌های ماسه‌ای، نسبت δ_{vm}/H در بازهٔ ٪۰/۰۹ الی ٪۰/۱٤ قرار گرفته‌است که این بازه کمی کمتر از نتایج مطالعات آزمایشگاهی در این پژوهش می‌باشد. مطابق با مطالعات موردی وانگ و همکاران [6] که در خاک‌های نرم انجام شده بودند، نسب بیشینه نشست سطحی زمین به عمق گودبرداری در بازهٔ ٪۰/۱ الی ٪۰/۸گزارش شده‌است که مطابقت خوبی با نتایج آزمایش‌های صورت‌گرفته در این پژوهش دارد.



شکل ۱۰ نمودارهای نشست سطح زمین

(فاصلهٔ مرکزبه‌مرکز شمع‌ها ۱۵۰ میلی‌متر است)



شکل ۱۱ نمودارهای نشست سطح زمین
(فاصلهٔ مرکزبه‌مرکز شمع‌ها ۱۰۰ میلی‌متر است)

در آزمایش‌های شمارهٔ (۱) و (۲) بالای شمع‌های سازهٔ نگهبان به عقب برگشته بودند و سبب فشردگی خاک در پشت دیواره شده بودند. این مطلب را می‌توان در نمودارهای (الف) و (ب) ارائه‌شده در شکل (۷) مشاهده نمود. پروفیل نشست خاک در نمودارهای ارائه‌شده در نمودارهای شکل مذکور به‌صورت مقعر می‌باشد که این نوع شکل از نشست با مشاهدات صورت‌گرفته توسط کلاف و اروک [22] درمورد دیوارهای مهارشده و دوخت به پشت می‌باشد. پروفیل نشست خاک در نمودارهای ارائه‌شده در آزمایش‌های شکل (۱۱) به‌صورت مثلثی بوده‌است که این نوع شکل از نشست با مطالعات موردی انجام‌شده توسط او و همکاران [23] مطابقت دارد.

بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر تغییرشکل‌های زمین و دیوارهٔ گود

در این پژوهش به مطالعه و بررسی تأثیر رفتار گودبرداری در خاک ماسه‌ای پرداخته شده‌است. در انجام این مطالعات، از سه پارامتر تأثیرگذار از قبیل فواصل بین شمع‌های سازهٔ نگهبان (S/D)، نحوهٔ گیرداری انتهای شمع‌ها و نیز، وجود سربار در مجاورت گودبرداری، درجهت بررسی رفتار دیوارهٔ گود و نشست سطحی زمین مورد استفاده قرار گرفته‌است.

لازم است تا قبل از انجام تحلیل و بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌ها به چند مورد اشاره‌ای کوتاه گردد: در مطالعات و آزمایش‌های این پژوهش دو نوع فاصلهٔ شمع از قبیل S1=150mm و S2=100mm مطابق با توضیحات ارائه‌شده در جدول (٤) و فرضیات تحقیق، درنظر گرفته شده‌است؛ لذا باتوجه به مشخصات هندسی جعبهٔ آزمایش و نیز فواصل بین شمع‌ها در حالت S1 و S2، به‌ترتیب از تعداد ۷ و ۱۰ عدد شمع در آزمایش‌های این پژوهش استفاده گردیده‌است. از طرفی، براساس آیین‌نامهٔ FHWA، حداقل فاصلهٔ افقی بین انکرها بایستی به‌اندازه‌ای اتخاذ گردد که اثرات گروهی میان انکرهای مجاور به حداقل برسد و از تقاطع انکرها

به‌دلیل انحراف از حفاری اجتناب شود. تأثیر گروه، ظرفیت باربری انکرهایِ تک را کاهش می‌دهد [24]؛ بنابراین باتوجه به این مطلب مهم، جدول (۹) معرف تعداد شمع‌ها و انکرهای مورد استفاده در مدل فیزیکی می‌باشد.

جدول ۹ تعداد شمع‌ها و انکرها در مدل فیزیکی

عنوان آزمایش	تعداد شمع‌ها	تعداد انکرها
TNX150	۷	۷
TNF150		
TSX150		
TSF150		
TNX100	۱۰	۵
TNF100		
TSX100		
TSF100		

باتوجه به توضیحات اخیر، در ابتدا به بررسی و مقایسهٔ تأثیرگذاری پارامتر S/D بر رفتار سازهٔ نگهبان و زمین مجاور اقدام گردیده‌است. با افزایش فواصل بین شمع‌ها انتظار می‌رود که جابه‌جایی جانبی دیواره و نشست سطحی زمین افزایش پیدا کند؛ اما مطابق با نتایج آزمایش‌های شمارهٔ ۱ الی ۸ که در جدول (۵ و ۸) ارائه شده‌اند، مشاهده می‌گردد که با افزایش فواصل بین شمع‌های دیواره، جابه‌جایی جانبی دیواره و نشست سطحی زمین به‌مقدار چشم‌گیری کاهش پیدا کرده‌است. پس از انجام بررسی‌های لازم این نتیجه به‌دست آمده‌است که علاوه‌بر تأثیرگذاری پارامتر S/D (تعداد شمع‌ها) بر رفتار گودبرداری، پارامتر دیگری در این رفتار نقش دارد و آن وجود انکرها در مدل فیزیکی است. نتایج آزمایش‌ها حاکی از این مطلب است که تعداد انکرها در مدل نقش پررنگ‌تر و مهم‌تری نسبت‌به پارامتر فواصل شمع‌ها ایفا می‌کند. هم‌چنین این موضوع از منظر سختی سیستم سازهٔ نگهبان قابل توضیح است. با کاهش در تعداد شمع‌ها، سختی دیوارهٔ شمع درجا کاهش داشته‌است اما از طرفی، با کاهش فواصل بین انکرها و افزایش در تعداد آنها واقع در یک ردیف، سختی مهارها در مدل فیزیکی افزایش داشته‌است؛ بنابراین با کاهش سختی دیوارهٔ شمعی و از طرفی با افزایش سختی سیستم مهاری، می‌توان بیان نمود سختی کل سیستم سازهٔ نگهبان افزایش یافته‌است و بیشینه جابه‌جایی جانبی دیواره به‌مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کرده‌است. این نتیجه مطابق با گزارش‌های ارائه‌شده توسط ملکی و همکاران می‌باشد [۲۵]؛ بنابراین، بامقایسهٔ نتایج آزمایش‌ها که در جدول‌های (۵ و ۸) ارائه گردیده‌است می‌توان بیان داشت در آزمایش‌هایی که فواصل بین شمع‌ها زیادتر بوده و تعداد انکرهای بیشتری مورد استفاده قرار گرفته‌است، مقادیر جابه‌جایی جانبی دیواره و نشست سطحی زمین به‌ترتیب به‌اندازهٔ ۷۱٪–۴۵٪ و ۳۵۵٪–۷۲٪ کاهش پیدا کرده‌است.

در ادامه به بررسی تأثیرگذاری نحوهٔ گیرداری انتهای شمع‌ها بر رفتار گودهای مهاربندی‌شده اقدام شده‌است. مطابق با نتایج آزمایش‌ها در ابتدای مراحل گودبرداری تغییرشکل‌های دیوارهٔ گود در حالت پای آزاد بیشتر از حالت پای گیردار می‌باشد. اگرچه با پیشرفت مراحل گودبرداری، جابه‌جایی جانبی دیوارهٔ گود مهاربندی‌شده در هر دو حالت افزایش یافته‌است، اما باتوجه به نتایج بررسی‌ها می‌توان بیان نمود به‌طور کلی تغییرمکان جانبی دیواره در حالت پای گیردار دیرتر و کندتر آغاز شده، لیکن آهنگ رشد آن نسبت‌به حالت پای آزاد سریع‌تر بوده‌است. بنابراین مقدار تغییرمکان نهایی دیوارهٔ گود مهاربندی‌شده در حالت انتهای گیردار نسبت‌به حالت پای آزاد (بستر نرم) بیشتر بوده‌است. مطابق با جدول (۵) درصورت گیردار بودن انتهای شمع‌ها (پای گیردار)، جابه‌جایی‌های جانبی دیواره درحدود ۸۱٪– ۵۹٪ نسبت‌به حالت پای آزاد افزایش پیدا کرده‌است. هم‌چنین، باتوجه به توضیحات ارائه‌شده و نتایج آزمایش‌ها در این پژوهش، مقدار

بیشینه نشست سطحی زمین نیز در حالت پای آزاد بسیار کمتر از حالت پای گیردار شمع‌ها مشاهده گردیده‌است؛ لذا مطابق با جدول (۸)، نشست سطحی زمین درصورت آزاد بودن انتهای شمع‌ها (بستر نرم)، درحدود ٪۹۱- ٪۳۸ کاهش پیدا کرده‌است.

هم‌چنین، پارامتر تأثیرگذار وجود سربار بر رفتار گودهای مهاربندی‌شده مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌است. مطابق با جدول (۵) درصورت حضور سربار در مجاورت گودبرداری، جابه‌جایی‌های دیواره درحدود ٪۳۸- ٪۱۷ افزایش پیدا کرده‌است. هم‌چنین، مطابق با جدول (۹)، مقادیر بیشینه نشست سطحی زمین در حالت وجود سربار درحدود ٪۱۶٤- ٪۰ بیشتر از حالت عدم حضور سربار در مجاورت گودبرداری افزایش یافته‌است.

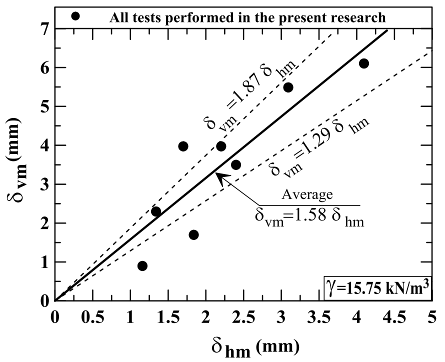
رابطهٔ بین δ_{vm} و δ_{hm}

جدول (۱۰) معرف نسبت بیشینه نشست سطح زمین به بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوار (δ_{vm}/δ_{hm}) می‌باشد. این مقادیر طبق نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش بیان شده‌اند. همان‌طور که در جدول مذکور ملاحظه می‌شود نسبت δ_{vm}/δ_{hm} در بازهٔ ۰/۷۸ الی ۲/۳۵ قرار گرفته‌است. این نتایج مطابق با گزارش‌های ارائه‌شده براساس مطالعات موردی توسط محققان مختلف می‌باشد [6, 12, 21, 23, 26].

هم‌چنین، شکل (۱۲) رابطهٔ بین بیشینه نشست سطح زمین و بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوار را نشان می‌دهد. مرز بالا و پایین مقادیر بیشینه نشست سطح زمین (δ_{vm}) در بازهٔ $1.29\delta_{hm}$ الی $1.87\delta_{hm}$ قرار گرفته‌است که میانگین مقادیر $1.58\delta_{hm}$ بوده‌است. این مقادیر با بیشینه نشست سطح زمین طبق نتایج گلدبرگ [26] که در بازهٔ $0.5\delta_{hm}$ الی $2\delta_{hm}$ است، مطابقت دارد. هم‌چنین مطابق با نتایج مورمن [21]، مقادیر مذکور در بازهٔ عددی $0.25\delta_{hm}$ الی $1\delta_{hm}$ برای ماسه گزارش شده‌اند. اطلاعات دیگری در رابطهٔ بین جابه‌جایی‌های دیوار و نشست سطح زمین ناشی از گودبرداری ارائه شده‌است از جمله مانا و کلاف [12] او و همکاران [23]، هسی و او [8] نشان دادند که بیشینه نشست سطح زمین در بازهٔ عددی $0.5\delta_{hm}$ الی $1\delta_{hm}$ قرار دارد.

جدول ۱۰ رابطهٔ بین بیشینه نشست سطحی زمین و بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوار

عنوان آزمایش	(δ_{hm}) (mm)	(δ_{vm}) (mm)	δ_{vm}/δ_{hm}
TNX150	۱/۸٤	۱/۷	۰/۹۲
TNF150	۱/۱٦	۰/۹	۰/۷۸
TSX150	۲/٤	۳/۵	۱/٤٦
TSF150	۱/۳٤	۲/۳	۱/۷۲
TNX100	۳/۱	۵/۵	۱/۷۷
TNF100	۱/۷	٤	۲/۳۵
TSX100	٤/۱	٦/۱	۱/٤۹
TSF100	۲/۲	٤	۱/۸۲



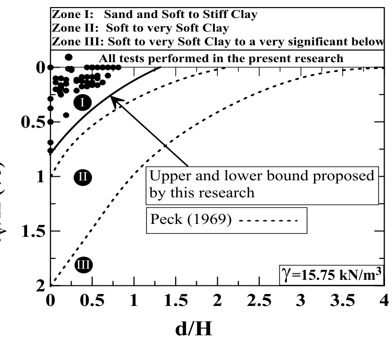
شکل ۱۲ بیشینه نشست سطحی زمین درمقابل عمق گودبرداری

الگوی نشست سطحی زمین

در شکل (۱۳) رابطهٔ بین نشست سطح زمین به عمق گودبرداری (δ_v/H) و فاصله از گودبرداری به عمق گودبرداری (d/H) برای آزمایش‌های شمارهٔ (۱) الی (۸) نشان داده شده‌است. به‌طور کلی توزیع نشست سطحی زمین به فاصله‌ای حدود 1.2H از لبهٔ گود گسترش پیدا کرده‌است. در این شکل، توزیع نواحی پیشنهادی

نشست سطح زمین توسط پک [27] برای مقایسه نشان داده شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، برای تمامی آزمایش‌های این پژوهش، نشست سطح زمین در ناحیهٔ I واقع گردیده‌است و مقادیر بیشینه نشست سطح زمین (δ_{vm}) کمتر از 0.76%H می‌باشد. مطابق با نتایج آزمایش‌های شمارهٔ (۱) الی (۸) و باتوجه به شکل مذکور، بزرگی مقادیر اندازه‌گیری‌شده مربوط به نشست سطحی زمین، کمتر از مشاهدات صورت‌گرفته در شرایط مشابهِ زمین، توسط مطالعات پک [27] می‌باشد. شاید کمتر بودن مقادیر نشست سطحی زمین، مربوط به تعداد کم آزمایش‌های انجام‌شده در پژوهش حاضر است و شاید دلیل دیگر این باشد که نتایج آزمایش‌ها در این پژوهش مربوط به بررسی رفتار گودهای مهاربندی‌شده توسط سیستم شمع و انکراژ بوده‌است و دیگر سیستم‌های پایداری را شامل نمی‌شود. هم‌چنین، می‌توان دلیل دیگر را این‌گونه بیان نمود که استفاده از روش پایدارسازی گود توسط سیستم ترکیبی شمع و انکراژ، موجب کاهش قابل توجه در مقادیر تغییرشکل دیواره و نشست سطحی زمین شده‌است.

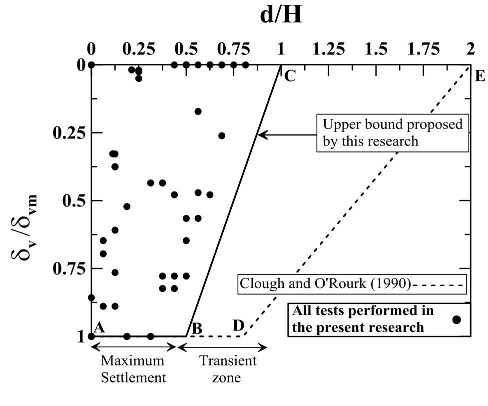
شکل (۱۳) نشان‌دهندهٔ توزیع نشست سطحی زمین ناشی از گودبرداری می‌باشد.



شکل ۱۳ توزیع نشست سطح زمین ناشی از گودبرداری

باتوجه به شکل (۱۳)، مرز بالایی یعنی خط منحنی AB برای حفاظت از گودبرداری توسط سیستم ترکیبی شمع و انکراژ، در این پژوهش برای خاک ماسه‌ای پیشنهاد گردیده‌است. از این مرز می‌توان برای تخمین و ارزیابی الگوی حداکثر تغییرشکل محتمل زمین در مجاورت گودبرداری به‌منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی، استفاده نمود.

شکل (۱٤) نشان‌دهندهٔ نشست سطحی زمین نرمال‌شده توسط بیشینه نشست زمین (δ_v/δ_{vm}) در مقابل فاصله از لبهٔ گود (d/H) می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی برای آزمایش‌ها شمارهٔ (٤) الی (۸)، بیشینه نشست سطحی زمین در نزدیکی دیوارهٔ گود (d/H=0) رخ می‌دهد، یعنی در این حالت $\delta_v = \delta_{vm}$ می‌باشد؛ اما در آزمایش‌های شمارهٔ (۱) الی (۳)، نشست سطحی زمین در نزدیکی دیواره درحدود $0\delta_{vm} - 0.86\delta_{vm}$ متغیر است. شکل (۱٤) معرف توزیع نشست سطحی زمین حاصل از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش می‌باشد که خط ABC مرز پیشنهادی برای این توزیع معرفی گردیده‌است. دو منطقهٔ نشست در پوش ذوزنقه‌ای‌شکل قابل تعریف است. در فاصلهٔ 0≤d/H≤0.5 (محدودهٔ خط AB) ناحیه‌ای است که در آن بیشینه نشست سطحی زمین رخ می‌دهد. درحالی‌که در فاصلهٔ 0.5≤d/H≤1 (محدودهٔ خط BC) ناحیه‌ای تحت عنوان منطقهٔ گذرا وجود دارد که نشست‌های سطحی زمین از مقادیر بیشینه به مقادیر قابل اغماض کاهش پیدا می‌کند. منحنی نشست سطحی زمین براساس مطالعات موردی کلاف و اورورک [22] برای خاک‌های نرم به‌منظور انجام مقایسه در شکل مذکور نشان داده شده‌است (خط ADE).



شکل ۱٤ رابطهٔ بین نشست زمین نرمال‌شده توسط بیشینه نشست درمقابل فاصله از دیوار

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به رفتار دیوار حائل شمع درجا با مهاربندی انکراژ در خاک ماسه‌ای به‌وسیلهٔ مدل‌سازی آزمایشگاهی پرداخته شده‌است. در آزمایش‌های انجام‌شده، سه پارامتر تأثیرگذار بر رفتار دیوار شامل فاصلهٔ مرکزبه‌مرکز شمع‌های سازهٔ نگهبان، وجود سربار در مجاورت گودبرداری و نیز گیرداری انتهای شمع‌های سازهٔ نگهبان مورد بررسی قرار گرفته‌است. براساس تفسیر نتایج آزمایش‌ها موارد زیر را می‌توان استنباط نمود:

۱. بیشینه جابه‌جایی جانبی دیوار با پیشرفت مراحل گودبرداری افزایش پیدا کرده‌است. مقادیر δ_{hm}/H برای حالتی که فاصلهٔ مرکزبه‌مرکز شمع‌ها ۱۵۰ میلی‌متر بوده‌است، در بازهٔ ٪۰/۱۴۵ الی ٪۰/۳ و هم‌چنین برای حالتی که فاصلهٔ شمع‌ها به ۱۰۰ میلی‌متر کاهش پیدا کرده‌است، مقادیر δ_{hm}/H در بازهٔ ٪۰/۲۱ الی ٪۰/۵۱ قرار گرفته‌اند.

۲. بیشینه نشست سطحی زمین با پیشرفت مراحل گودبرداری افزایش پیدا کرده‌است. مقادیر δ_{vm}/H برای حالتی که فاصلهٔ مرکزبه‌مرکز شمع‌ها ۱۵۰ میلی‌متر بوده‌است، در بازهٔ ٪۰/۱۱ الی ٪۰/٤٤ و هم‌چنین برای حالتی که فاصلهٔ شمع‌ها به ۱۰۰ میلی‌متر کاهش پیدا کرده‌است، مقادیر δ_{vm}/H در بازهٔ ٪۰/٥۰ الی ٪۰/۷٦ قرار گرفته‌اند.

۳. با افزایش فواصل بین شمع‌های دیوارهٔ گود، تغییرشکل‌های زمین و دیوارهٔ گود به‌ترتیب به‌مقدار ٪۷۱- ٪٤٥ و ٪۳٥٥- ٪۷۲ کاهش پیدا کرده‌است. دلیل این کاهش مطابق با بررسی‌های صورت‌گرفته آن بود که با افزایش تعداد انکرها در مدل، سختی کل سیستم سازهٔ نگهبان افزایش پیدا کرده و به موجب آن تغییرمکان‌های جانبی دیواره و نشست سطحی زمین به مقدار قابل توجهی کاهش یافته‌است.

٤. باتوجه به نتایج بررسی‌ها می‌توان بیان نمود به‌طور کلی تغییرمکان جانبی دیواره در حالت پای گیردار دیرتر و کندتر آغاز شده، لیکن آهنگ رشد آن نسبت‌به حالت پای آزاد سریع‌تر بوده‌است؛ بنابراین مقدار تغییرمکان نهایی دیوارهٔ گود مهاربندی‌شده و به تبع آن، نشست سطحی زمین در حالت انتهای گیردار نسبت‌به حالت پای آزاد (بستر نرم) بیشتر بوده‌است. مطابق با نتایج آزمایش‌ها، درصورت گیردار بودن انتهای شمع‌ها (پای گیردار)، جابه‌جایی‌های جانبی دیواره درحدود ٪۸۱~٪٥۹ و نشست سطحی زمین درحدود ٪۹۱~٪۳۸ نسبت‌به حالت پای آزاد (بستر نرم) افزایش پیدا کرده‌است.

٥. مطابق با بررسی‌های صورت‌گرفته براساس نتایج آزمایش‌ها، مشاهده می‌گردد که نسبت δ_{vm}/δ_{hm} در بازهٔ ۰/۷۸ الی ۲/۳٥ قرار گرفته‌است.

٦. براساس نتایج آزمایش‌ها، به بررسی و تعیین عمق مدفون دیواره اقدام گردیده‌است. نسبت D/H برای روش پایدارسازی گود توسط سیستم ترکیبی شمع و انکراژ در حدود ٪۲٥ به‌دست آمده‌است. این نسبت مطابق با توصیه‌های پیشنهادی توسط آیین‌نامهٔ FHWA می‌باشد.

۷. مرز بالا و پایین مقادیر بیشینه نشست سطح زمین (δ_{vm}) در بازهٔ $1.29\delta_{hm}$ و $1.87\delta_{hm}$ قرار گرفته که میانگین مقادیر $1.58\delta_{hm}$ بوده‌است.

۸. در این پژوهش نمودارهای توزیع نشست سطحی زمین براساس نتایج آزمایش‌ها ترسیم گردیده‌است. به‌طور کلی توزیع نشست سطحی زمین به‌فاصله‌ای حدود 1.2H از لبهٔ گود گسترش پیدا کرده‌است. در این نمودارها دو مرز AB وABC به‌منظور تخمین و ارزیابی الگوی حداکثر تغییرشکل محتمل زمین در مجاورت گودبرداری برای مطالعات آزمایشگاهی و به‌ویژه مدل‌های فیزیکی بزرگ مقیاس، پیشنهاد گردیده‌است.

مراجع

1. Ou, C. Y., Chiou, D. C., Wu, T. S., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations", *Journal of Geotechnical Engineering*; Vol.122, No.5, Pp. 337-45,(1996).
2. Ou. C. Y., Shiau, B. Y., Wang, I. W., "Three-dimensional Deformation Behavior of the Taipei National Enterprise Center (TNEC) Excavation Case History", *Canadian Geotechnical Journal*; Vol.37, No.2, Pp. 438-48, (2000).
3. Ou, C. Y., Deep Excavation: Theory and Practice. Netherlands: Taylor & Francis, (2006).
4. Kung, G. T., Juang, C. H., Hsiao, E. C., Hashash, Y. M., "Simplified Model for Wall Deflection and Ground-Surface Settlement Caused by Braced Excavation in Clays", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*; Vol.133, No.6, Pp. 731-47, (2007).
5. Hsiung, B. C. B., "A Case Study on the Behaviour of a Deep Excavation in Sand, Computers and Geotechnics", Vol.36, No.4, Pp. 665-75, (2009).
6. Wang, J. H., Xu, Z. H., Wang, W. D., "Wall and Ground Movements due to Deep Excavations in Shanghai Soft Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*; Vol.136, No.7, Pp. 985-94, (2010).
7. Finno, R. J., Atmatzidis, D. K., Perkins, S. B., "Observed Performance of a Deep Excavation in Clay", *Journal of Geotechnical Engineering*; Vol.115, No.8, Pp. 1045-64, (1989).
8. Hsieh, P. G., Ou, C. Y., "Shape of Ground Surface Settlement Profiles Caused by Excavation", *Canadian Geotechnical Journal*; Vol. 35, No.6, Pp. 1004-17, (1998).
9. Hwang, R. N., Moh, Z. C., Wang, C. H., "Performance of Wall Systems during Excavation for Core Pacific City", *Journal of GeoEngineering*; Vol. 2, No.2, Pp. 53-60, (2007).
10. Hwang, R. N., Moh, Z. C., Wang, C. H., "Toe Movements of Diaphragm Walls and Correction of Inclinometer Readings", *Journal of GeoEngineering*; Vol. 2, No.2, Pp. 61-71, (2007).
11. Long, M., "Database for Retaining Wall and Ground Movements due to Deep Excavations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*; Vol. 127, No.3, Pp. 203-24, (2001).
12. Mana A. I., Clough, G. W., "Prediction of Movement for Braced Cut in Clay", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*; Vol.107, No.6, Pp. 759-77, (1981).
13. Nikolinakou, M. A., Whittle, A. J., Savidis, S., Schran, U., "Prediction and Interpretation of the Performance of a Deep Excavation in Berlin Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*; Vol.137, No.11, Pp. 1047-61, (2011).
14. Burland, J. B., Hancock, R. J. R., "Underground Car Park at the House of Commons: Geotechnical Aspects", The Structural Engineer; Vol. 55, No.2, Pp. 87-100, (1977).
15. Wen, R. K., "Model Studies of Laterally Loaded Pile Foundations", Proceedings of the Thirty-Fourth Annual Meeting of the Highway Research Board. Washington D. C., Pp. 140-52, (1955).
16. Matlock, H., Repperger, E. A., "Theoretical Analysis and Laboratory Studies of Laterally Loaded

Model Pile Segments", Report to Shell oil Co., Austin, Tex. (1957).

17. Prakash, S., Behavior of pile groups subjected to lateral loads: Thesis (Ph. D.)-University of Illinois at Urbana-Champaign, (1962).
18. Davisson, M. T, Salley, J. R., "Model Study of Laterally Loaded Piles", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*; Vol. 96, No.5, Pp. 1605-27, (1970).
19. Hsiung, B. C. B., Yang, K. H., Aila, W., Hung, C., "Three-dimensional Effects of a Deep Excavation on Wall Deflections in Loose to Medium Dense Sands", Computers and Geotechnics; 80 (138-51), (2016).
20. Ou, C .Y, Liao, J .T, Cheng, W. L., "Builging Response and Ground Movements Induced by a Deep Excavation", *Geotechnique*; Vol. 50, No.3, Pp. 209-20, (2000).
21. Moormann, C., "Analysis of Wall and Ground Movements due to Deep Excavations in Soft Soil based on a New Worldwide Database", Soils and Foundations; Vol.44, No.1, Pp. 87-98, (2004).
22. Clough, W., O'Rourke, T. D., "Construction Induced Movements of in Situ Wall", Design and Performance of Earth Retaining Structures. ASCE, GSP. 1990; 25(439-70, Discussion: ASCE, GT April, Pp. 662-664, (1992).
23. Ou, C. Y, Hsieh, P. G, Chiou, D. C., "Characteristics of Ground Surface Settlement During Excavation", *Canadian Geotechnical Journal*; Vol. 30, No.5, Pp. 758-67, (1993).
24. Sabatini, P. J., Pass, D. G., "Bachus RC. Geotechnical Engineering Circular No. 4 . Ground Anchors and Anchored Systems", Rep. No. FHWA-IF-99-015, Federal Highway Administration, Washington D. C., (1999).

۲۵. ملکی، م.، بائی، ب.، بیتنی، ب.، «بررسی تأثیر اندرکنش گودبرداری و سازهٔ مجاور آن در تحلیل گودبرداری‌ها در محیط‌های شهری»، فصل‌نامهٔ مهندسی عمران فردوسی، سال ۲۱، شمارهٔ ۲، بهار و تابستان ۱۳۸۹، (۲۰۱۱).

26. Goldberg D. T., Jaworski W. E., Gordon M. D., "Lateral Support System and Underpinning", Rep. No. FHWA-RD-75-129, Federal Highway Administration, Washington D. C., (1976).
27. Peck, R.B., "Deep Excavation and Tunelling in Soft Ground", Proc, *7th Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, State-of-the-Art. Pp. 225-90, (1969).